



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenl gungsschrift**  
⑩ **DE 198 51 967 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 02 B 5/10**  
G 02 B 7/188

②1 Aktenzeichen: 198 51 967.2  
②2 Anmeldetag: 11. 11. 1998  
④3 Offenlegungstag: 25. 5. 2000

DE 198 51 967 A 1

⑦1 Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑦2 Erfinder:  
Laermer, Franz, Dr., 70437 Stuttgart, DE; Frey,  
Wilhelm, Dr., 70178 Stuttgart, DE; Neumann,  
Juergen, 86850 Fischach, DE

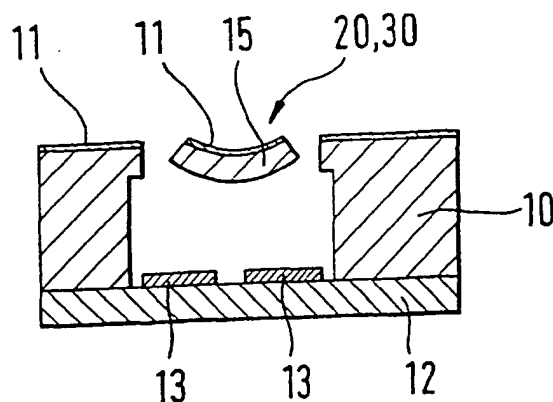
⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 42 35 593 A1  
DE 42 24 599 A1  
DE 39 34 381 A1  
FR 21 05 045  
EP 07 54 958 A2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Mikrospiegel und Verfahren zu seiner Herstellung

⑤7 Es wird ein Mikrospiegel und ein Verfahren zu dessen Herstellung vorgeschlagen, wobei als abbildendes Element eine Membran (20) vorgesehen ist, die durch permanent induziert mechanische Spannung verwölbt ist. Der Mikrospiegel hat insbesondere die Form eines sphärischen Hohlspiegels. Die Verwölbung der Membran (20) wird über ein Aufbringen einer tensil verspannten Schicht (11, 11a) auf einen monolithischen Membrangrundkörper (15, 15b) oder eine Dotierung mit Fremdatomen mit unterschiedlichen Atomradien erreicht. Die Membran (20) kann weiterhin über Stege (16) mit einem Tragkörper (10) nach Art eines Schwingspiegels federnd verbunden sein und über Elektroden (13) elektrostatisch angeregte Torsionsschwingungen ausführen. Der vorgeschlagene Mikrospiegel eignet sich zum Einsatz in einer statischen Sensitiveinrichtung, einem Scanner, einen Baulaser oder in der optischen Innenraumsensierung von Kraftfahrzeugen.



DE 198 51 967 A 1

## Beschreibung

## Stand der Technik

Die Erfindung betrifft einen Mikrospiegel und ein Verfahren zu seiner Herstellung nach Gattung der unabhängigen Ansprüche.

Zur optischen Sensierung wird häufig eine optische Abbildung vom Gegenstand (Urbild) zum sensierenden Element (Bild) verlangt. Dies kann nach dem Stand der Technik mit einer Mikrolinse bewerkstelligt werden, die einfallendes Licht in die Bildebene fokussiert, wo sich das eigentliche Sensorelement befindet, das beispielsweise ein Thermopile zur Infrarotsensierung (Aufnahme von Körperstrahlung), ein Bolometer oder ein Halbleiterdetektor für Infrarot sein kann. Das eigentliche Sensorelement kann dabei auch aus einem Pixelarray aus sensierenden Einzelzellen nach Art einer Kamera bestehen. Falls lediglich ein einzelnes Sensorelement verwendet wird, kann eine Ortsauflösung durch periodisches Abtasten des relevanten Gegenstandsbereiches durch ein zusätzliches abtastendes Element erfolgen. Dies kann beispielsweise eine periodische Bewegung der Mikrolinse oder eine Schwingung der Mikrolinse sein, wobei die Zuordnung des detektierten Intensitätssignals zur Ortskoordinaten über eine zeitliche Demodulation mit der Schwingungsbewegung des abtastenden Elementes erfolgt.

Die Verwendung von Linsen liefert zwar die gewünschte Abbildung auf das Sensorelement, sie erfordert aber speziell im infraroten Wellenlängenbereich aufwendige Herstellungstechniken wie beispielsweise Plasmastrukturierungen. Außerdem weisen Linsen häufig unvermeidbare Abbildungsfehler wie eine chromatische Aberration auf.

Ein einfacherer Ansatz ist die Verwendung von Mikrosiegeln als fokussierende Elemente. Ein derartiger abbildender Mikrospiegel ist bekannt aus der Veröffentlichung "Micro-Electro-Mechanical Focusing Mirrors", IEEE, (MEMS 1998), Catalog, Nr. 98CH36176, Seite 460-465 von D.M. Burns und V.M. Bright. Hierin wird ein Mikrospiegel aus konzentrischen Ringen aus Polysilizium, die eine Breite von ca. 30 µm aufweisen, zu einer freitragenden Membran mit einem Durchmesser von typischerweise ca. 1 mm verbunden, wobei zwischen den einzelnen Ringen jeweils ein Spalt von ca. 2 µm verbleibt. Die Verbindung der einzelnen Ringe untereinander erfolgt punktuell in diesen Spalten über schmale Brücken aus Polysilizium. Zur Erzeugung einer Verwölbung der Membran wird auf die Ringe der Membran eine ca. 500 nm dicke Goldschicht aufgebracht, so daß sich die Membran über eine induzierte mechanische Spannung zu einem sphärischen Hohlspiegel verwölbt. Die erzeugte verwölbte Membran ist weiterhin über vier oder acht Stege, die auch als oder Heizleiter dienen, mit einem umgebenden Substrat elektrisch verbunden. Über die Heizleiter kann der Membran und insbesondere der Goldschicht periodisch Wärme zugeführt werden, so daß sich der Krümmungsradius der Membran und damit ihre Abbildungseigenschaften als Funktion der Temperatur ändern. Ein derartiger Mikrospiegel hat jedoch den Nachteil, daß die mikro-mechanische Fertigung der konzentrischen Ringe und ihr Verbindung untereinander sehr aufwendig ist.

Außerdem treten unerwünschte Abbildungsfehler des Spiegels insbesondere bei Verwendung von monochromatischem Licht auf, die auf Interferenzen aufgrund der periodischen Anordnung der konzentrischen Ringe beruhen.

## Vorteile der Erfindung

Der erfindungsgemäße Mikrospiegel mit den kennzeichnenden Merkmalen des Hauptanspruches, hat gegenüber

dem Stand der Technik den Vorteil, daß er sich relativ leicht und in größerer Stückzahl mit ausreichend hohem und leicht einstellbarem Krümmungsradius, insbesondere unter Verwendung bekannter Verfahren aus der Siliziumtechnik in sehr vielfältiger Form der eigentlichen Spiegelfläche bzw. Membran herstellen läßt und zudem über hervorragende Abbildungseigenschaften verfügt. Dabei wird eine Membran verwendet, die einen monolithischen Membrangrundkörper aufweist und die durch permanent induzierte Spannungen verwölbt ist. Der Membrangrundkörper ist vorteilhaft mit zumindest einer auf den Membrangrundkörper aufgebracht oder innerhalb des Membrangrundkörpers erzeugten Schicht versehen, die die mechanische Spannung induziert. Diese Schichten sind weiterhin sehr vorteilhaft untereinander und mit dem Membrangrundkörper flächig fest verbunden. Dadurch ergeben sich eine Vielzahl von möglichen Herstellungsparametern wie die Form der Membran, der jeweils gewählte Schichtaufbau bzw. Schichtabfolge innerhalb der Membran, der Krümmungsradius und die optischen Eigenschaften der Oberfläche der Membran, die eine einfache und gezielte Anpassung des erfindungsgemäßen Mikrospiegels an die jeweilige Verwendung erlauben.

Weiterhin eignet sich das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Mikrosiegeln mit weitgehend beliebigen Formen der verwölbten Membran. So kann diese die Form eines verwölbten Kreises, Quadrates oder einer Ellipse haben bzw. einen Hohlspiegel formen. Die Form der verwölbten Membran kann dabei in sehr einfacher Weise über an sich bekannte Verfahren zur Strukturierung und Ätzung von Silizium unter Verwendung geeigneter Ätzmaskierungen aus einem Tragkörper heraus erfolgen.

Aufgrund seiner guten Abbildungseigenschaften und seines einfachen Herstellungsverfahrens, das sich mühelos in bekannte Verfahren aus der Siliziumstrukturierung in der Mikromechanik integrieren läßt, kann der erfindungsgemäße Mikrospiegel somit insbesondere sehr vorteilhaft und preisgünstig als Scanner, bei Baulaseranwendungen oder in der optischen Innenraumsensierung von Kraftfahrzeugen eingesetzt werden.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

So kann der Krümmungsradius der Spiegelmembran und somit die Abbildungseigenschaften des Mikrospiegels sehr einfach dadurch eingestellt werden, daß man eine tensil verspannte Schicht auf einen Membrangrundkörper aufbringt, so daß sich der dadurch entstehende Schichtkörper, der die Spiegelmembran bildet, verwölbt, wobei über die Wahl des Materials der tensil verspannten Schicht, des Verfahrens zum Aufbringen dieser Schicht und der Dicke der Schicht gezielt die der Grad Verwölbung der Membran oder des Membrangrundkörpers eingestellt werden kann. Im übrigen ist es natürlich auch möglich, anstelle einer tensil verspannten Schicht, die eine permanente Zugspannung induziert, eine oder mehrere Schichten auf den Membrangrundkörper aufzubringen oder innerhalb des Membrangrundkörpers zu erzeugen, die eine permanente Druckspannung induziert, so daß sich eine Verwölbung der Membran in umgekehrter Richtung bzw. mit umgekehrtem Vorzeichen ergibt.

Wenn der erzeugte Mikrospiegel beispielsweise ein sphärischer Hohlspiegel ist, wird dieser hinsichtlich seiner Abbildungseigenschaften nur durch den Grad der Verwölbung und die Dicke und die intrinsische Zugspannung der aufgetragenen tensil verspannten Schicht bestimmt. Damit kann der erfindungsgemäße Mikrospiegel sehr vorteilhaft eingesetzt werden, um ein Urbild auf einen optischen Strahlungssensor oder ein Sensorarray abzubilden, wobei im Gegensatz zu einer Linse keine Abbildungsfehler durch chromati-

sche Aberration auftreten.

Um den Mikrospiegel als Infrarotstrahlungsreflektor verwenden zu können, muß zumindest dessen Membran als abbildendes Element mit einer eine Infrarotstrahlung reflektierenden Schicht beschichtet werden, da Silizium im Infraroten transparent ist. Dabei hat sich die Verwendung einer Goldschicht als tensil verspannte Schicht auf dem Membrangrundkörper als besonders vorteilhaft herausgestellt, da damit sowohl die erforderliche tensile Verspannung, und somit die Verwölbung in einfacher Weise eingestellt werden kann, als auch günstige optische Eigenschaften des hergestellten Hohlspiegels hinsichtlich Infrarotreflektivität erzielt werden. Eine Goldschicht ist beispielsweise ein idealer Infrarotstrahlungsreflektor und zudem chemisch sehr umweltbeständig. Die genauen Spiegelparameter lassen sich somit bei gegebener intrinsischer Schichtspannung leicht über die Dicke der aufgetragenen Goldschicht einstellen.

Weiterhin ist es sehr vorteilhaft möglich, die Membran aus einer Kombination von mehreren, aus unterschiedlichen Materialien zusammengesetzten, zumindest teilweise tensil verspannten Schichten aufzubauen. So weisen beispielsweise generell aufgedampfte Metallschichten eine hohe tensile Eigenspannung auf und eignen sich damit nahezu unabhängig vom Metall vielfach für das erfindungsgemäße Verfahren. Bei gesputterten Metallschichten entscheiden wesentlich die Sputterparameter und eine vorgenommene thermische Nachbehandlung der aufgesputterten Metallschicht über die intrinsischen Streßeigenschaften. Somit hat der Fachmann die Wahl unter verschiedenen Verfahren zum Aufbringen der tensil verspannten Schicht und kann entweder das gerade bei ihm verfügbare Verfahren einsetzen oder anhand einiger Vorversuche, die für die geplante Verwendung des Spiegels optimale Methode ermitteln. Als sehr vorteilhaft hat sich das Aufdampfen von Metallschichten und insbesondere von Gold erwiesen.

Bei einer Kombination von mehreren Schichten kann in vorteilhafter Weise zur Einstellung eines gewünschten Spannungszustandes der Membran zunächst beispielsweise auf einem Membrangrundkörper aus Silizium eine zugverspannte Schicht aus beispielsweise Siliziumnitrid, Siliziumoxinitrid, einer Kombination beider Materialien oder einem siliziumreichen Siliziumoxid von ausreichender Dicke aufgebracht werden, welche die benötigte tensile Spannung liefert. Anschließend kann darüber dann eine dünne Goldschicht als optisch im Infraroten reflektierende Schicht aufgebracht werden, die die Gesamtspannung auf der Membran nicht signifikant ändert. Die Goldschicht kann selbstverständlich auch dicker gewählt werden, wenn man ihr Spannungsverhalten in die Gesamtkalkulation mit einbezieht, so daß die gesamte Schichtstruktur der Membran das gewünschte, für die Hohlspiegelfunktion optimale Spannungsverhalten aufweist.

Weiterhin ist es sehr vorteilhaft, daß die Erzeugung mechanischer Spannungen in der Membran des Mikrospiegels auch über eine Dotierung mit Fremdatomen mit vom Wirtsgitter unterschiedlichem, insbesondere kleinerem Atomradius erfolgen kann, wobei die Membran zunächst aus einem monolithischen Membrangrundkörper besteht, der dann oberflächlich dotiert wird. Somit bildet sich ein Konzentrationsgradient und eine dotierte Oberflächenschicht in dem Membrangrundkörper aus, was über die unterschiedlichen Atomradien zu mechanischen Spannungen in dem Membrangrundkörper und somit auch der erzeugten Membran führt und diese verwölbt. Dieses Verfahren zur Erzeugung von permanenten intrinsischen mechanischen Spannungen hat gegenüber aufgetragenen tensilen Schichten den Vorteil, daß die erzeugte Membranverwölbung weitgehend temperaturunabhängig ist, da keine unterschiedliche thermische

Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Schichten auftreten. Weiterhin können damit die optischen Eigenschaften des Mikrospiegels weitgehend unabhängig von den mechanischen Eigenschaften der gegebenenfalls benötigten Reflexionsschichten gewählt werden. Sehr vorteilhaft ist auch, daß die Erzeugung von mechanischen Spannungen über eine Dotierung mit den in der Halbleitertechnik üblichen Prozessen kompatibel ist und daß die induzierte mechanische Spannung in weiten Grenzen über die Variation der Dotierstoffkonzentration, der Eindringtiefe, über einen nachfolgenden Temperprozeß zur Veränderung der Eindringtiefe oder die Auswahl geeigneter Dotierstoffmaterialien eingestellt werden kann.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, daß die abbildende Funktion des Mikrospiegels mit einer scannenden Funktion kombiniert wird, das heißt, einer den Urbildbereich des Mikrospiegels abtastenden Funktion. Dazu wird die verwölbte Membran des Mikrospiegels als freitragende Membran aus einem Tragkörper herausstrukturiert, die über mindestens einen Steg federnd mit dem verbliebenen Rest des Tragkörpers verbunden ist. In dem Fall, daß die Membran beispielsweise über zwei einander gegenüberliegende Stege federnd mit dem verbliebenen Teil des Tragkörpers verbunden ist, kann bei geeigneter Dimensionierung der Federstege, eine Torsion um die durch die Stege definierte Achse ausgeführt werden. Bei dieser, an sich bekannten Technik, können beispielsweise zwei oder vier Zusatzelektroden verwendet werden, die vermöge elektrischer Feldkräfte bzw. elektrostatischer Kräfte, die aus einer an die Elektroden und/oder an die Membran angelegten elektrischen Spannung resultieren, die Membran zu einer Torsionsschwingung anregen. Im Falle einer Torsionsachse nach Art eines einachsigen Schwingenspiegels erhält man somit einen abbildenden Mikrospiegel, der seine Umgebung entlang einer Urbildgeraden abtastet und beispielsweise auf ein sensierendes Element wie beispielsweise eine Photozelle abbildet.

Wird die Membran über vier Stege, die paarweise coaxial unter einem Winkel von 90° angeordnet sind, freitragend federnd mit dem verbleibenden Teil des Tragkörpers verbunden, kann der Mikrospiegel in weiterer vorteilhafter Weiterbildung der Erfindung um zwei Torsionshauptachsen über angebrachte Elektroden zum Schwingen angeregt werden und somit seine Umgebung innerhalb einer Urbildebene abtastern. Dazu werden dann beispielsweise zwei Elektrodenpaare für einen elektrostatischen Schwingungsantrieb unter der Membran benötigt. Das Abtastern entlang der Urbildebene kann dabei analog zu einer Vidiconröhre in Zeilen und Spalten erfolgen, derart daß eine schnelle Schwingung um eine Torsionsachse beispielsweise das Zeilenraster besorgt, während eine langsame überlagerte Schwingung um die andere Torsionsachse bewirkt, daß jede Zeile höher oder tiefer als die vorhergehende Zeile erfolgt, so daß sich eine überlagerte spaltenweise Abtastung ergibt. Es ist weiterhin sehr vorteilhaft möglich, im Falle einer zu analysierenden Situation in einem Kraftfahrzeug eine für den speziellen Fall angepaßte Abtaststrategie einzusetzen, wie zum Beispiel eine Abtastung der Umgebung auf Bahnkurven nach Art einer Lissajou-Figur oder eine Konzentration der Abtastung auf besonders signifikante Bereiche.

Mit Hilfe der beschriebenen Techniken kann so die gesamte Umgebung des Mikrospiegels als Urbildebene abgetastet werden und beispielsweise eine detektierte Infrarot-helligkeitsinformation einem sensierenden Element sequentiell zugeführt werden, wobei gleichzeitig das erhaltene Intensitäts-Zeit-Signal in an sich bekannter Weise mit dem Schwingungssignal demoduliert wird, um den Ort zu errechnen, der zu dem erhaltenen Intensitäts-Zeitsignal ge-

hört.

Weiterhin ist es in vorteilhafter Weiterbildung der Erfindung in einfacher Weise möglich, einen rasternden Mikrospiegel mit einer Anordnung von mehreren sensierenden Elementen wie beispielsweise Photozellen oder Infrarotdetektoren in Form eines Pixelarrays zu kombinieren, womit sich die räumliche Auflösung in der vom Mikrospiegel erfaßten Urhildebene erheblich verbessert. Beispielsweise kann man sehr vorteilhaft in einer Raumrichtung mit einem Pixelzeilenarray arbeiten und die zweite Raumrichtung gleichzeitig über den rasternden Mikrospiegel erfassen. Dazu genügt dann ein um eine Torsionsachse schwingender Mikrospiegel als einachsiger Schwingenspiegel. Besonders in der Kombination mit Pixelarray geringer Pixelzahl wie  $1 \times 16$  Pixeln oder  $2 \times 8$  Pixeln ergeben sich so erhebliche Vorteile hinsichtlich räumlicher Auflösung und Detektionsgeschwindigkeit.

#### Zeichnung

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der Zeichnung und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Die Fig. 1 bis 4 zeigen die Verfahrensschritte zur Erzeugung des erfindungsgemäßen Mikrospiegels und Fig. 5 zeigt eine Draufsicht auf Fig. 4. Die Fig. 6 bis 9 zeigen verschiedene Ausführungsbeispiele des Mikrospiegels.

#### Ausführungsbeispiele

Die Fig. 1 bis 5 erläutern ein erstes Ausführungsbeispiel des Mikrospiegels und ein Verfahren zu seiner Herstellung. Zunächst wird zur Herstellung des Mikrospiegels in Form eines sphärischen Hohlspiegels 30 auf der Vorderseite eines Siliziumwafers, der im weiteren als Tragkörper 10 für den Mikrospiegel dient, zunächst in die Waferrückseite in an sich bekannter Weise über Trocken- oder Naßätzverfahren eine definierte quaderförmige Aussparung 21 herausstrukturiert, so daß eine freitragende, gleichmäßige, dünne Siliziumfläche entsteht, die in der Draufsicht eine rechteckige Form hat. Die Form dieser Aussparung 21 kann jedoch auch, angepaßt an die gewünschte Form des Mikrospiegels, beispielsweise die Form eines Zylinders haben, so daß sich in der Draufsicht eine kreisförmige Fläche ergibt.

Im nächsten Verfahrensschritt wird dann gemäß Fig. 2 auf die noch unstrukturierte Vorderseite des Tragkörpers 10 eine tensil gespannte Schicht 11 aufgebracht, d. h. eine Schicht die eine intrinsische permanente mechanische Schichtspannung aufweist, die in ihrer Stärke gezielt eingestellt wird. Durch die induzierte tensile mechanische Spannung wird die freitragende dünne Siliziumfläche somit von innen nach außen hin nach oben gewölbt, sobald im weiteren Verfahrensschritt die Verbindung mit dem umgebenden Tragkörper 10 zumindest weitgehend unterbrochen wird. Dadurch entsteht die Form eines abbildenden Hohlspiegels 30.

Gemäß Fig. 3 wird die freitragende dünne Siliziumfläche mit der aufgetragenen tensil gespannten Schicht 11 in einem nächsten Ätzschritt in an sich bekannter Weise über eine aufgetragene Ätzmaskierung aus dem umgebenden Tragkörper 10 freigelegt, so daß unmittelbar nach dem Freilegen eine über die von der tensil gespannten Schicht 11 induzierten mechanischen Spannungen verwölbte Membran 20 (Fig. 4) entsteht. Die Membran 20 besteht gemäß diesem Ausführungsbeispiel aus einer Schichtstruktur mit einem Membrangrundkörper 15 als Grundschicht, der beispielsweise aus Silizium besteht, und einer tensil gespannten Schicht 11 (Fig. 6). Das Freilegen der Membran 20 aus dem Tragkörper 10 erfolgt so, daß die Membran 20 über mindestens einen Steg 16 freitragend mit dem Tragkörper 10 ver-

bunden bleibt (Fig. 5). Zur Erzeugung einer homogenen Verwölbung der Membran 20 sind die Schicht 11 und der Membrangrundkörper 15 insbesondere auf ihrer gesamten Berührungsfläche fest miteinander verbunden.

Beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 5 ist die Membran 20 über zwei einander gegenüberliegende Stege 16 federnd mit dem die Membran 20 umgebenden Tragkörper 10 nach der Art eines einachsigen Schwingenspiegels verbunden, so daß die Membran Torsionsschwingungen um die durch die Stege 16 definierte Achse ausführen kann.

Nach dem Freilegen der Membran 20 wird dann, wie in Fig. 4 weiter dargestellt, der Tragkörper 10 mit der damit freitragend verbundenen verwölbten Membran 20 rückseitig in an sich bekannter Weise auf einem Substrat 12 befestigt. Auf dem Substrat 12, das aus für die jeweilige Verwendung angepaßten Materialien wie Silizium, Glas, einem Polymer, einer Leiterbahnplatte oder einem Metall besteht, sind zur Anregung von Torsionsschwingungen zwei elektrisch voneinander getrennte Elektroden 13 angebracht, an die über nicht dargestellte elektrische Anschlüsse eine Wechselspannung angelegt wird, so daß über die Polung der Ladung der Elektroden auf die Membran 20 insbesondere periodische elektrostatische Kräfte wirken, die eine Torsion des Mikrospiegels um die durch die Stege 16 definierte Achse bewirken. Zusätzlich kann dabei in Weiterbildung der Erfindung auch an die Membran 20 über eine entsprechende Oberflächenstrukturierung des Wafers mit Leiterbahnen eine elektrische Spannung an die Membran 20 angelegt werden, um diese Kräfte zu verstärken und die Membran 20 mit einer sich periodisch ändernden Ladung zu belegen. Die Zuführung dieser Ladung ist besonders einfach möglich, wenn die Stege 16 oberflächlich metallisiert als Leiterbahnen verwendet werden und die Membran 20, wie beispielsweise im Fall einer aufgetragenen Goldschicht, oberflächlich metallisiert ist.

Über die von den Elektroden hervorgerufenen Kräfte bildet sich somit bei geeigneter Wahl der Stärke und Frequenz der elektrischen Wechselspannung – in Abhängigkeit von der jeweils gewählten Geometrie wie beispielsweise Form des Spiegels, Abstand Elektroden-Spiegel, Dicke der Stege und Geometrie der Elektroden – eine Torsionsschwingung des Mikrospiegels aus.

Im erläuterten Ausführungsbeispiel bildet die Membran 20 die Form des sphärischen Hohlspiegels 30, sie kann – in Abhängigkeit von der vorgenommenen Strukturierung der freitragenden Siliziumfläche – aber ebenso die Form eines verwölbten Quadrates, eines verwölbten Rechteckes, einer verwölbten Ellipse oder eines verwölbten Kreises haben, so daß sich das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Hohlspiegeln mit allgemeiner Grundfläche, insbesondere aber auch von sphärischen Hohlspiegeln eignet. Die erzeugten Hohlspiegel 30 werden hinsichtlich ihrer Abbildungseigenschaften insbesondere durch die Form und den Grad der Verwölbung der Membran 20 bestimmt.

Die aufgetragene tensil gespannte Schicht 11 ist eine dünne Goldschicht, die bei einem typischen Durchmesser der Membran 20 von ca. 0,5 mm bis 5 mm und bei einer Dicke der Membran 20 von ca. 1 µm bis 50 µm eine Dicke von 100 nm bis 1000 nm hat. Die Goldschicht wird in an sich bekannter Weise beispielsweise über Aufdampfen aufgebracht. Die Schichtdicke bestimmt dabei sehr wesentlich den Grad der Verwölbung der Membran 20.

Neben einer Goldschicht eignen sich auch eine Vielzahl anderer Materialien und insbesondere Metalle zum Erzeugen der tensil gespannten Schicht 11. Wesentlich ist jeweils nur eine gute Haftung auf der Membran 20, eine homogene Schichtdicke, eine Verträglichkeit mit dem Material des Membrangrundkörpers 15, eine möglichst einfache Ab-

scheidetechnik und die Erzeugung von mechanischen Spannungen in der tensil verspannten Schicht 11 über die Abscheidetechnik.

Alternativ kann die tensil verspannte Schicht 11 auch über Sputtern aufgebracht werden. Aufdampfen hat dabei gegenüber Sputtern jedoch den Vorteil, daß aufgedampfte Metallschichten bereits generell eine hohe tensile Eigenspannungen aufweisen, während diese bei gesputterten Metallschichten über die Sputterparameter und eine thermische Nachbehandlung der aufgesputterten Schicht eingestellt oder erzeugt werden müssen. Die genauen Spiegelparameter lassen sich somit bei gegebener intrinsischer Schichtspannung sehr einfach über die Dicke der aufgedampften Goldschicht einstellen.

In einem weiteren Ausführungsbeispiel wird anstelle einer tensil verspannten Goldschicht eine tensil verspannte Siliziumnitrid-, siliziumreiche Siliziumoxid-, Siliziumoxynitridschicht oder eine tensil verspannte Schicht 11 aus einer Kombination dieser Materialien über Aufdampfen, Aufputtern, PVD (physical vapour deposition) oder CVD (chemical vapour deposition) aufgebracht.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel der Erfindung sieht vor, daß eine Kombination mehrerer Schichten auf dem Tragkörper 10 übereinander aufgebracht werden. Dies wird anhand der Fig. 7 erläutert, die in einem Ausschnitt von Fig. 4 lediglich die Membran 20 zeigt, wobei auf dem Membrangrundkörper 15 aus Silizium zunächst eine tensil verspannte Siliziumnitrid-, Siliziumoxynitrid oder eine tensil verspannte siliziumreiche Siliziumoxidschicht oder eine sonstige tensil verspannte Schicht 11a aus einer Kombination dieser Materialien aufgebracht ist, auf die eine weitere tensil verspannte Deckschicht 11b aus beispielsweise Gold folgt. Die Deckschicht 11b ist dabei ein idealer Infrarotstrahlungsreflektor, der sich durch eine besonders hohe chemische Umweltbeständigkeit auszeichnet. Somit eignet sich der Mikrospiegel mit der aufgetragenen Goldschicht als Deckschicht 11b oder als tensil verspannter Schicht 11 besonders als Spiegel für den infraroten Wellenlängenbereich.

Die erläuterten Ausführungsbeispiele werden in einer weiteren Ausführungsform der Erfindung auch so ausgeführt, daß das Abscheiden der tensil verspannten Schicht 11 auf dem Tragkörper 10 gemäß Fig. 2 nicht auf der gesamten Oberfläche des Tragkörpers 10, sondern über eine einfache Maskierung der Oberfläche des Tragkörpers 10 lediglich in einem Bereich erfolgt, der später die gemäß Fig. 3 herausstrukturierte Membran 20 bildet. Die Zusammensetzung des dadurch im Bereich der herausstrukturierten Membran 20 erzeugten Schichtkörpers bleibt dabei völlig analog den erläuterten Ausführungsbeispielen. Diese Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung des Mikrospiegels vermeidet unerwünschte, im Tragkörper 10 induzierte Spannungen, da diese örtlich auf die Membran 20 beschränkt bleiben.

Eine weiteres Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Mikrospiegels sieht vor, daß die permanent induzierte mechanische Spannung, die zum Verwölben der Membran 20 führt, nicht durch Aufbringen einer zusätzlichen, insbesondere tensil verspannten Schicht 11 auf dem gesamten Tragkörper 10 oder lediglich dem Bereich der Membran 20 erzeugt werden, sondern durch Dotierung der Membran 20 mit Fremdatomen.

Dabei ist zunächst wesentlich, daß die in die Membran 20 eingebrachten Fremdatome einen im Vergleich zum Wirtsgitter unterschiedlichen und insbesondere kleineren Atomradius aufweisen, so daß durch Dotierung mit Atomen mit geringerem Radius als die Atome des Wirtsgitters Zugspannungen entstehen.

Ein Ausführungsbeispiel unter Verwendung einer Dotie-

rung wird anhand der Fig. 8 erläutert, die die Membran 20 als Ausschnitt aus Fig. 4 zeigt. In diesem Fall ist die Membran 20 zunächst ein monolithischer Membrankörper aus Silizium, der aus einem Stück hergestellt ist und insbesondere keine Strukturierungen aufweist. Die monolithische Platte wird dann oberflächlich mit Phosphor oder Boratomen dotiert. Die Dotierung erfolgt entweder über eine an sich aus der Halbleitertechnik bekannte Ionenimplantation durch Beschuß des monolithischen Membrankörpers mit entsprechenden Ionen oder über eine thermisch induzierte Diffusion von auf den Membrankörper aufgebrachtem Material. Auch eine Kombination von Ionenimplantation mit thermisch induzierter Diffusion hat sich zweckmäßig erwiesen. Nach Abschluß der Dotierung hat sich somit innerhalb des monolithischen Membrankörpers eine dotierte Oberflächenschicht 15a gebildet und ein im wesentlichen undotierter Membrangrundkörper 15b. Die dotierte Oberflächenschicht 15a in dieser als Membran 20 verwendeten Schichtstruktur führt somit aufgrund der induzierten mechanischen Spannung zu einer Verwölbung, deren Grad über die Dotierkonzentration, die lokale Verteilung der Dotieratome im Wirtsgitter, das Dotiermaterial und die Dicke der Membran 20 bestimmt oder eingestellt wird.

Zweckmäßigerweise erfolgt die Dotierung des Tragkörpers 10 auch bei diesem Ausführungsbeispiel lediglich in dem Bereich, der nach dem Herausstrukturieren die Membran 20 bildet. Dazu werden beispielsweise über eine Oberflächenmaskierung Ionen nur in diesem Bereich implantiert.

Besonders wichtig bei der Erzeugung einer Verwölbung der Membran 20 ist ein Konzentrationsgradient der Dotieratome von der Oberfläche des Tragkörpers 10 bzw. der Membran 20, da eine homogene Dotierkonzentration nicht zu der gewünschten Verwölbung führt. Dieser Konzentrationsgradient stellt sich jedoch aufgrund des Verfahrens zur Erzeugung der Dotierung über Ionenimplantation von selbst ein. Hinsichtlich der Dicke der dotierten Oberflächenschicht 15a im Verhältnis zum Membrangrundkörper 15b hat es sich als besonders günstig erwiesen, wenn diese ein ungefähres Verhältnis ihrer Dicken von 1 : 100 bis 1 : 10 haben. Dieses Verhältnis ist aber stark abhängig von der jeweiligen Konzentration an Fremdatomen, der Stärke des erzielten Konzentrationsgradienten und von den mechanischen Eigenschaften des Wirtsgitters sowie von der gewünschten Verwölbung. Insofern muß der Fachmann an dieser Stelle anhand einiger Eichversuche die Verwölbung als Funktion der Dotierkonzentration bestimmen. In jedem Fall ist es zur Gewährleistung guter Abbildungseigenschaften des erzeugten Hohlspiegels wichtig, daß die Dotierkonzentration und auch der erzielte Dotierstoffkonzentrationsgradient in der dotierten Oberflächenschicht 15a auf der gesamten Oberfläche der Membran 20 möglichst homogen ist, da es sonst zu ungleichmäßigen Verwölbungen der Membran 20 kommt.

Zur Nachjustierung der Dotieratomverteilung in der dotierten Oberflächenschicht 15a oder einer Verbreiterung der dotierten Oberflächenschicht 15a auf Kosten des Membrangrundkörpers 15b kann ein Temperprozeß nach dem Dotieren und vor dem Herausstrukturieren der Membran 20 (Fig. 3) nachgeschaltet werden. Dieses Tempern kann aber auch erst am fertigen Mikrospiegel vollzogen werden, so daß während des Temperns in situ die Veränderung der Abbildungseigenschaften des Mikrospiegels geprüft bzw. nachjustiert werden. Insbesondere hat man damit die Möglichkeit, sich aufgrund einer lateral geringfügig inhomogenen Dotieratomverteilung ergebende Abbildungsfehler des erzeugten Mikrospiegels am fertigen Produkt zu korrigieren, indem man den Mikrospiegel nicht als Ganzes tempert, sondern lediglich die dotierte Oberflächenschicht 15a lokal definiert erwärmt.

In einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung wird neben einer Dotierung entsprechend dem vorangehenden Beispiel, eine zusätzliche Goldschicht oder eine Kombination mehrerer, insbesondere tensil verspannter Schichten auf die dotierte Oberflächenschicht **15b** aufgebracht. Dies wird anhand der **Fig. 9** erläutert, in der die Membran **20** mit einer dotierten Oberflächenschicht **15a** und einem im wesentlichen undotierten Membrangrundkörper **15b** dargestellt ist, auf die zusätzlich eine weitere Deckschicht **11c** aufgebracht ist. Diese Deckschicht **11c** besteht in diesem Fall aus Gold und erfüllt somit gleichzeitig auch die Aufgabe der tensil verspannten Schicht **11**, d. h. sie induziert zusätzliche mechanische Spannungen in der Membran **20**. Somit kann man sehr einfach die günstigen optischen Eigenschaften einer Goldschicht mit den über die Dotierung erzielten mechanischen Spannungen zur Verwölbung der Membran **20** verknüpfen. Während eine sehr dünne Goldschicht von wenigen nm lediglich eine Reflexion im Infraroten und nur geringfügige mechanische Spannungen bewirkt, führt eine dickere Goldschicht von 50 nm bis 1000 nm zu einer sehr günstigen Kombination von induzierten mechanischen Spannungen aus der dotierten Oberflächenschicht **15a** und der aufgetragenen Goldschicht bei gleichzeitig guter Infrarotreflektivität des erzeugten Mikrospiegels. Das Verfahren der Dotierung mit Fremdatomen zur Verwölbung der Membran **20** unterstützt somit das Verfahren über das Aufbringen von tensil verspannten Schichten **11** und kann diese auch ersetzen.

Andererseits bewirkt eine Dotierung mit Fremdatomen mit größerem Atomradius eine Dehnung oder Druckspannung in der Membran, so daß eine derartige Dotierung einer tensilen Spannung durch eine aufgetragene tensil verspannte Schicht **11** entgegenwirkt.

#### Patentansprüche

1. Mikrospiegel mit einer durch eine permanent induzierte mechanische Spannung verwölbten Membran (**20**) als abbildendes Element, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Membran (**20**) einen monolithischen Membrangrundkörper (**15, 15b**) aufweist und daß der Membrangrundkörper (**15, 15b**) durch die permanent induzierte mechanische Spannung verwölbt ist.
2. Mikrospiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der monolithische Membrangrundkörper (**15, 15b**) mit zumindest einer auf dem Membrangrundkörper (**15, 15b**) aufgetragenen oder innerhalb des Membrangrundkörpers (**15b**) erzeugten Schicht (**11, 11a, 11b, 11c, 15a**) versehen ist, die jeweils die mechanische Spannung induziert.
3. Mikrospiegel nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Membrangrundkörper (**15, 15b**) aus Silizium besteht.
4. Mikrospiegel nach Anspruch 1 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (**20**) freitragend ist und über mindestens einen Steg (**16**) federnd mit einem die Membran (**20**) zumindest bereichsweise umgebenden Tragkörper (**10**) verbunden ist.
5. Mikrospiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel vorgesehen sind, so daß die Membran (**20**) eine Torsionsschwingung um den oder die Stege (**16**) als Torsionsachse ausführt.
6. Mikrospiegel nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel Elektroden (**13**) sind, die in der Umgebung der verwölbten Membran (**20**) angebracht sind.
7. Mikrospiegel nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß sich unterhalb der Membran (**20**) minde-

stens eine Elektrode (**13**) befindet, an der eine zeitlich veränderliche Spannung zur Erzeugung elektrostatischer Kräfte auf die Membran (**20**) anliegt.

8. Mikrospiegel nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine erzeugte Schicht eine mit Fremdatomen dotierte Oberflächenschicht (**15a**) auf dem Membrangrundkörper (**15, 15b**) ist, die im Vergleich mit den übrigen Atomen des Materials des Membrangrundkörpers (**15, 15b**) einen unterschiedlichen Atomradius aufweist.

9. Mikrospiegel nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Membrangrundkörper (**15, 15b**) derart dotiert ist, daß sich eine im wesentlichen undotierte Grundschrift (**15b**) und eine dotierte Oberflächenschicht (**15a**) ausbildet.

10. Mikrospiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (**20**) mindestens eine tensil verspannte Schicht (**11, 11a**) aufweist.

11. Mikrospiegel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Membrangrundkörper (**15, 15b**) aus Silizium besteht und eine tensil verspannte Schicht (**11, 11a**) aus Gold, Siliziumnitrid, Siliziumdioxid, einem Siliziumoxinitrid ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ), oder einem siliziumreichen Siliziumoxid aufweist.

12. Mikrospiegel nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß auf die tensil verspannte Schicht (**11, 11a**) oder den Membrangrundkörper (**15, 15b**) mindestens eine Deckschicht (**11b, 11c**) als Reflexionsschicht oder Schutzschicht aufgebracht ist.

13. Mikrospiegel nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die tensil verspannte Schicht (**11, 11a**) und/oder die Deckschicht (**11b, 11c**) im infraroten Wellenlängenbereich reflektiert.

14. Mikrospiegel nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (**20**) nach Art eines einachsigen Schwingspiegels über zwei gegenüberliegende Stege (**16**) federnd mit dem Tragkörper (**10**) verbunden ist und, angeregt durch die vorgesehenen Mittel, eine Torsionsschwingung um die durch die Stege (**16**) definierte Achse ausführt und dabei ihre Umgebung in einer Urbildgeraden abtastet und auf ein sensierendes Element abbildet.

15. Mikrospiegel nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (**20**) über vier zueinander senkrechte stehende Stege (**16**) federnd mit dem Tragkörper (**10**) verbunden ist und, angeregt durch die vorgesehenen Mittel, eine Torsionsschwingung um zwei zueinander senkrechte Torsionshauptachsen ausführt und dabei ihre Umgebung in einer Urbildebene abtastet und auf ein sensierendes Element abbildet.

16. Mikrospiegel nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Abrastern der Urbildebene auf definierten Bahnkurven, insbesondere Lissajou-Figuren erfolgt.

17. Verfahren zur Herstellung eines Mikrospiegels, wobei über an sich bekannte Strukturierungsverfahren aus einem Tragkörper (**10**) eine Membran (**20**) herausstrukturiert wird, die über eine induzierte permanente mechanische Spannung verwölbt wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die permanente mechanische Spannung vor dem Herausstrukturieren der Membran (**20**) durch Aufbringen mindestens einer tensil verspannten Schicht (**11, 11a**) auf den Tragkörper (**10**) und/oder durch Dotierung des Tragkörpers (**10**) mit Fremdatomen

men erzeugt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß zunächst ein Membrangrundkörper (15, 15b) aus dem Tragkörper heraus strukturiert wird und daß danach die Erzeugung der mechanischen Spannung durch Aufbringen mindestens einer tensil verspannten Schicht (11, 11a) und/oder durch Dotierung des Membrangrundkörpers (15, 15b) mit Fremdatomen erfolgt.

20. Verfahren nach Anspruch 17, 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, daß die permanente mechanische Spannung eine definierte Verwölbung der Membran (20) hinsichtlich Vorzeichen und/oder Krümmung bewirkt.

21. Verfahren nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Dotierung mit Fremdatomen wie insbesondere Bor oder Phosphor erfolgt, die einen, im Vergleich mit den Atomen des Materials des Membrangrundkörpers (15, 15b), unterschiedlichen Atomradius aufweisen.

22. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Dotierung des Membrangrundkörpers (15, 15b) derart erfolgt, daß sich eine im wesentlichen undotierte Grundschicht (15b) und eine dotierte Oberflächenschicht (15a) ausbildet.

23. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Dotierung über Ionenimplantation oder thermische Eindiffusion von Fremdatomen erfolgt.

24. Verfahren nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, daß die tensil verspannte Schicht (11, 11a) über Bedampfen oder Sputtern aufgebracht wird.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -



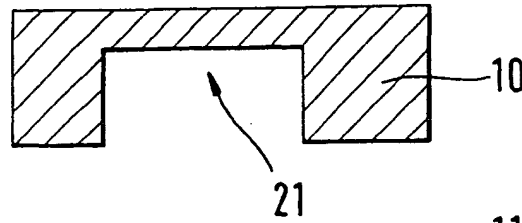


FIG. 1

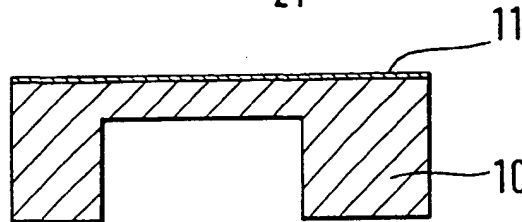


FIG. 2

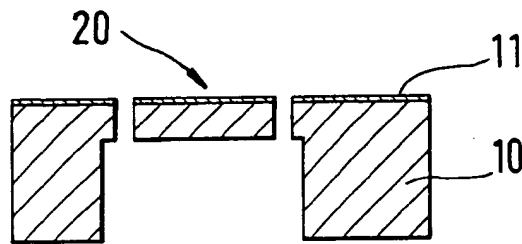


FIG. 3

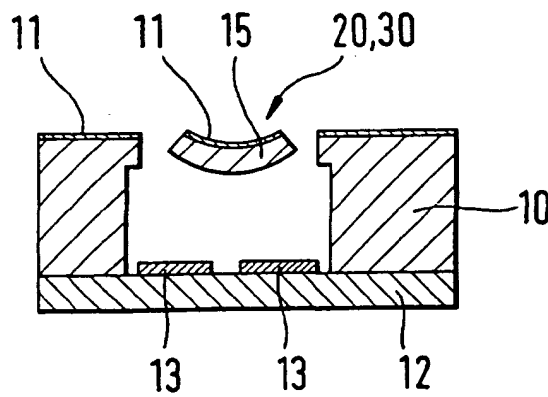


FIG. 4

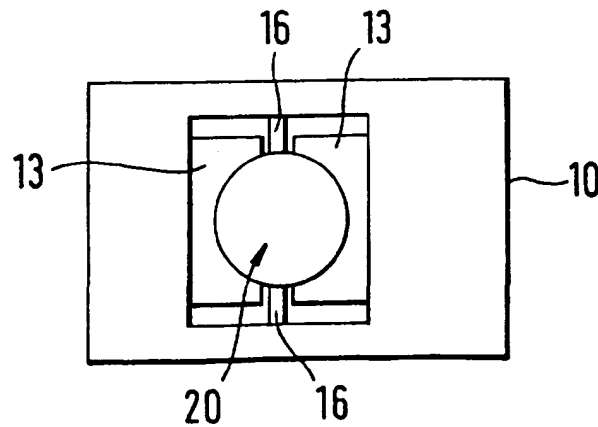


FIG. 5

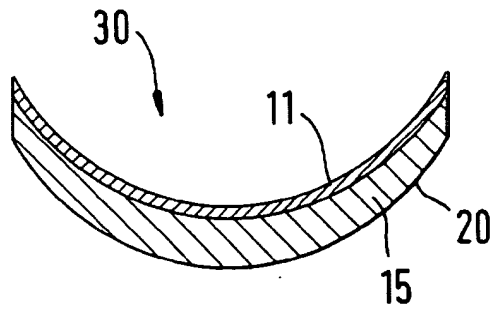


FIG. 6

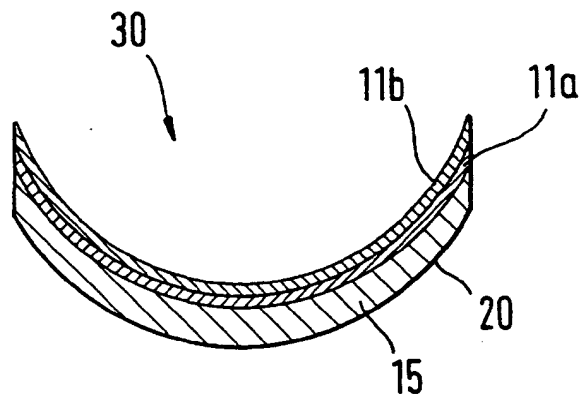


FIG. 7

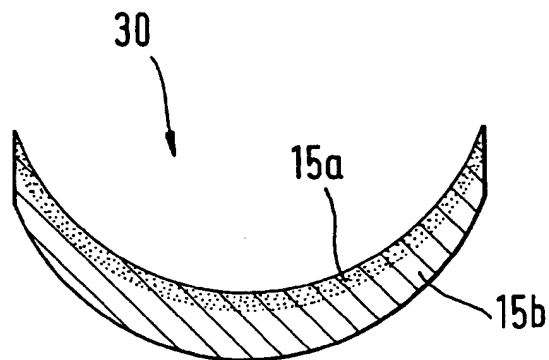


FIG. 8

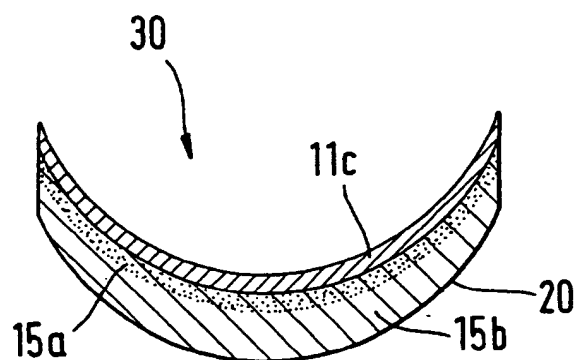


FIG. 9